

Hybrid-P3 근사화 기법을 이용한 반투명 재질의 효과적인 표현 기법

이승주, 김회민, 이관행
광주과학기술원 기전공학과
e-mail : {sf2952, mildhoe, khlee} @gist.ac.kr

Representation of translucent materials using hybrid-P3 approximation

Seung-Joo Lee, Hoi-Min Kim, Kwang-Hee Ko, Kwan H. Lee
Dept. of Mechatronics, GIST

요 약

반투명 재질의 효과적인 표현을 위해서 일반적으로 사용되는 빛의 확산 모델은 일반적 확산 모델(Standard Diffusion model: SDA)이다. 그러나 일반적 확산 모델은 흡수 변수 (absorption coefficient) σ_a 가 감소한 산란 변수(reduced scattering coefficient) σ_s 보다 상대적으로 큰 재질에 대해서는 부정확한 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 다양한 모델이 제시되었다. P_N 근사화 이론은 이러한 일반적 확산 모델이 가지고 있는 한계를 잘 극복한다. 우리는 일반적 확산 모델을 기반으로 하고 P_3 근사화 이론의 변수들을 이용하는 hybrid-P3 근사화 방법을 이용하여 흡수 변수가 감소한 산란 변수보다 상대적으로 큰 재질을 그래픽 공간 상에서 효과적으로 표현하는 방법을 제시한다. 또한 그 재질의 광학적 특성을 추정하기 위하여 우리가 제안하는 모델에 적합한 측정장비를 개발한다.

1. 서론

최근 디스플레이 장비가 발전함에 따라 영화 산업이나 제품 생산 분야에서는 보다 사실적이고 입체감이 있는 재질의 표현 기법이 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 반투명 재질의 효과적이고 사실적인 표현 기법은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 기존의 광학분야와 의료공학분야에서 진행된 반투명 재질의 광학적 특성을 고려한 보다 사실적인 반투명 재질의 표현 기법 연구는 빛의 확산 방정식의 이용을 통해서 실현된다.

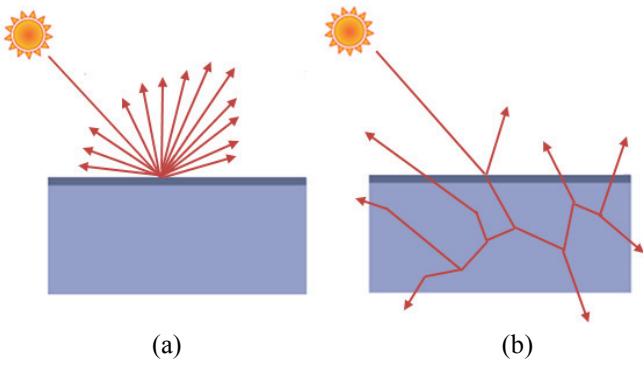
빛의 확산을 정확히 표현하는 방정식은 볼츠만의 수송 방정식 (Boltzman transport equation)이다[1][2][3]. 하지만 볼츠만의 수송 방정식은 해석학적인 문제로 실제로 계산하기에는 많은 어려움을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 근사화 이론이 제시되었다. 일반적 확산 모델 (Standard Diffusion model: SDA)은 그 정확도와 효율성 때문에 볼츠만의 수송 방정식의 근사화 식으로 널리 이용되고 있다 [4][5]. 이러한 SDA 를 기반으로 한 쌍극자 이론은 컴퓨터 그래픽 분야에서도 반투명 재질을 표현하기 위해 가장 많이 사용하고 있는 모델이다[6]. 하지만 SDA 를 기반으로 하는 쌍극자 이론은 흡수 변수 (absorption coefficient) σ_a 가 감소한 산란 변수(reduced scattering coefficient) σ_s 보다 상대적으로 큰 재질의

경우에는 부정확한 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 노력하기 위하여 본 논문에서는 hybrid-P3 근사화 이론을 이용하여 반투명 재질을 표현한다.

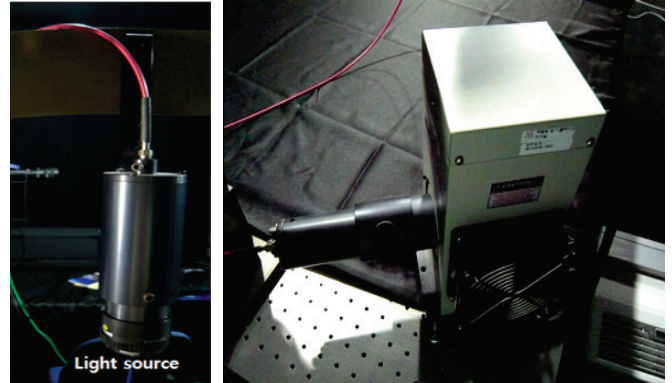
2. BSSRDF

대부분의 물질들은 재질의 성향에 따라 투명, 불투명 반투명 재질로 구분 된다. 그림 1 에서 보는 바와 같이 불투명 재질은 입사하는 빛이 재질의 표면에서만 반사가 이루어지는 반면에 불투명 재질은 표면에서의 반사뿐만 아니라 내부산란 과정도 동시에 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 반투명 재질의 특성을 잘 표현하는 함수는 BSSRDF (Bidirectional Scattering Surface Distribution Function)이다. BSSRDF 는 8 차원의 함수로 나타내지는데 재질의 특성이 등방성을 가지고 있다면 6 차원 함수로 근사화하여 사용할 수 있다. BSSRDF 는 표면의 한 위치에서 들어오는 방사 조도(irradiance)에 따른 다른 위치에서 나가는 광휘(radiance)의 비로써 나타낼 수 있다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$f_{\text{bssrdf}}(x_i, \vec{w}_i; x_o, \vec{w}_o) = \frac{L(x_o, \vec{w}_o)}{E(x_i, \vec{w}_i)}$$



(그림 1) (a) 불투명 재질 (b) 반투명 재질



(그림 2) (a) 광원부 (b) 제논(Xenon) 램프

3. Hybrid-P3 근사화 이론

Hybrid-P3 근사화 이론은 SDA 모델을 기반으로 하면서 상대적으로 흡수도가 높은 재질에는 부정확한 SDA의 한계를 잘 극복하는 모델인 R_N 근사화 이론의 변수를 사용하면서 보다 효율적인 반투명 재질의 표현을 가능하게 한다. Hybrid-P3 근사화 이론에서는 SDA에서 사용하던 attenuation 변수와 확산 변수를 P3 근사화 이론의 asymptotic attenuation 변수와 asymptotic 변수로 대체한다[7].

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t}$$

$$D = (3\sigma'_t)^{-1}$$

$$v^- = \pm \left[\frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - \gamma}}{18} \right]^{1/2}$$

$$D_{tr} = \sigma_a / (v^-)^2$$

위 식에서 D 는 확산 변수를 의미하고 σ'_t 는 reduced extinction 이고 흡수 변수와 감소한 산란 변수의 합을 의미한다. v^- 와 D_{tr} 은 asymptotic attenuation 변수와 asymptotic 변수이고 β 와 γ 는 아래와 같이 나타내어진다.

$$\beta = 27\sigma_a\sigma_t^1 + 28\sigma_a\sigma_t^3 + 35\sigma_t^2\sigma_t^3$$

$$\gamma = 3780\sigma_a\sigma_t^1\sigma_t^2\sigma_t^3$$

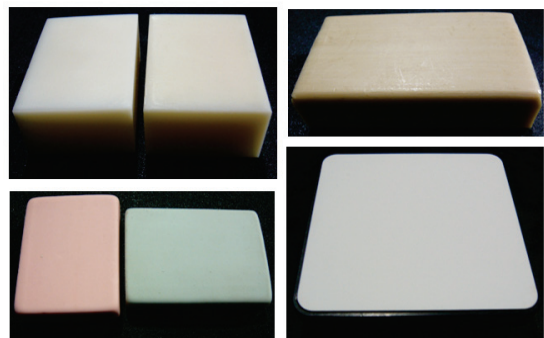
4. 측정장비

사실적인 반투명 재질의 특성을 표현하기 위하여 재질의 광학적 특성을 알아야만 하고 이런 특성들을 추출하기 위하여 우리의 모델에 적합한 측정장비를 개발한다. 반투명 재질 상에서의 광학적 특성을 추정하기 위하여 반투명 재질의 표면 위에 점 광원을 만드는 광원 부를 설계하고 이를 측정하기 위하여 기존의 CCD 카메라를 이용한다. 설계된 광원부의 광원으로 우리는 제논(Xenon) 램프를 사용한다. 제논 램프는 상대적으로 강한 빛을 내면서 태양광과 가까운 빛을 내는 장점을 가지고 있다. 그림 2는 우리가 제안하는 측정장비의 광원부와 광원부의 광원을 보여준다. 그리고 제안하는 측정 장비는 주변 광으로부터의 오류 값을 줄이기 위하여 암실에서 설치되었다. 제안하는

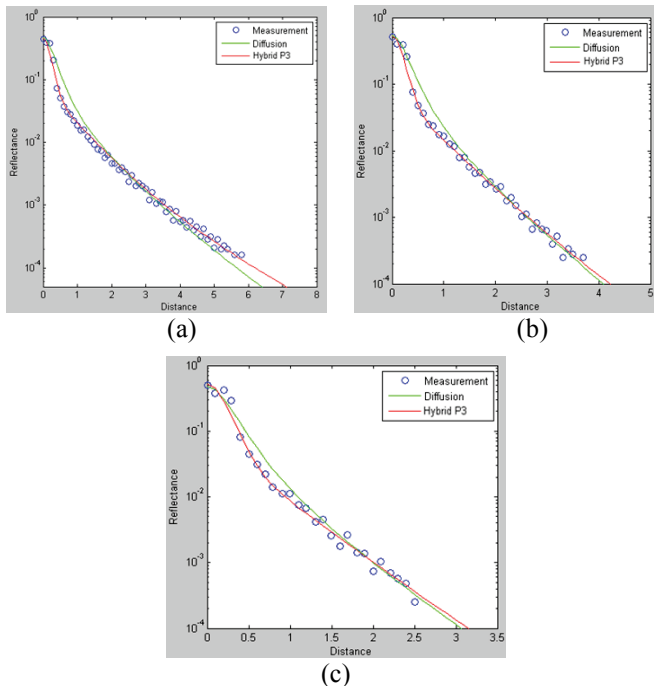
측정 장비를 이용하여 노출시간을 달리하는 12 장의 이미지를 획득하고 획득된 이미지들로부터 HDRI 데이터를 만드는 과정을 수행한다. 이때 노출 시간의 범위는 1ms에서 4,096ms로 제안하고 실험의 정확성을 위하여 다양한 반투명 재질을 측정한다. 우리가 실험에서 사용한 실험 재질은 우유, 비누, 케첩, 대리석 등이다. 그림 3은 우리가 측정한 다양한 반투명 재질들을 보여준다.

5. Fitting 과정

측정장비로부터 획득한 HDRI 데이터를 이용하여 재질의 광학적 특성을 추정하는 fitting 과정을 수행한다. 획득된 HDRI 데이터는 모든 픽셀이 빛의 강도를 저장하고 있다. 저장된 빛의 강도 중에서 가장 밝은 강도를 가지는 픽셀을 기준으로 하여 가상의 선을 생성하고 그 선에 대응하는 강도를 산출하게 되면 조사된 빛의 위치를 기준으로 거리에 따른 reflectance 곡선을 구할 수 있게 된다. 우리는 획득된 reflectance 곡선을 측정 reflectance 곡선으로 정의하고 측정 reflectance 곡선과 일반적 확산 모델과 hybrid-P3 근사화의 reflectance 식에 최적화 과정을 통하여 재질의 광학적 특성인 흡수 변수와 감소한 산란 변수를 추정한다. 우리의 실험 결과에서 우리가 측정한 비누의 광학적 특성은 일반적 확산 모델을 사용하였을 때는 R,G,B 채널에 대해서 (2.40, 0.053) (2.25, 0.14) (2.43, 0.32)이고 hybrid-P3 근사화를 사용하였을 때는 (2.72, 0.038) (2.82, 0.14) (2.48, 0.38)이었다.



(그림 3) 측정에 사용된 다양한 반투명 재질

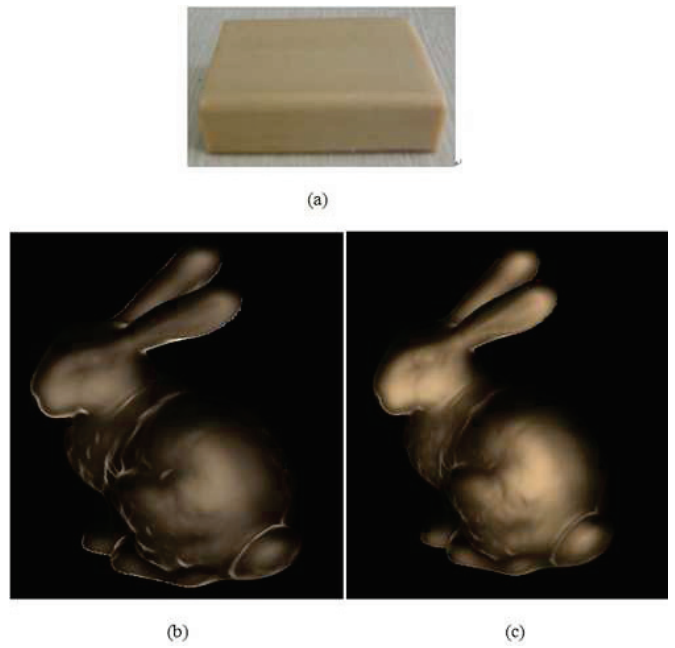


(그림 4) R,G,B 채널에 대한 측정 reflectance 곡선과 hybrid-P3 근사화와 일반적 확산모델의 reflectance 곡선 (a)red 채널 (b)blue 채널 (c)green 채널

측정 데이터에서 blue 채널의 흡수 변수가 감소한 산란 변수 값보다 상대적으로 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이렇게 추정된 광학적 특성인 흡수 변수와 감소한 산란 변수를 이용하여 일반적 확산 모델과 hybrid-P3 근사화의 reflectance 곡선을 구하고 이를 렌더링 과정에 적용한다. 그림 4 는 R,G,B 각각의 채널에서 비누의 측정 reflectance 곡선과 일반적 확산 모델과 hybrid-P3 근사화의 reflectance 곡선을 보여준다. 원으로 이루어진 곡선은 측정 reflectance 곡선을 나타내고 붉은색 선은 hybrid-P3 의 reflectance 곡선을, 녹색 선은 일반적 확산 모델의 reflectance 을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 흡수 변수가 감소한 산란 변수보다 상대적으로 큰 재질에 대해서 hybrid-P3 근사화가 일반적 확산 모델보다 더 측정 reflectance 곡선을 잘 따른다는 것을 알 수 있다.

6. 렌더링 결과

우리는 간단한 그래픽스 기술을 이용하여 반투명 재질을 표현한다. 앞에서 추정한 비누의 광학적 특성을 스탠포드 버니(Stanford bunny) 모델에 적용하여 일반적 확산 모델과 hybrid-P3 근사화 방법을 사용하였을 때의 결과를 비교한다. 그림 5 는 흡수 변수가 감소한 산란 변수보다 상대적으로 큰 재질의 특성을 가지고 있는 비누에 일반적 확산 모델과 hybrid-P3 근사화 방법을 사용하여 얻은 광학적 특성치를 스탠포드 버니에 적용한 렌더링 결과를 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이 흡수 변수가 감소한 산란 변수보다 상대적으로 큰 재질의 경우 hybrid-P3 근사화 방법이 일반적 확산 모델보다 실제 재질을 더 잘 표현하는



(그림 5) (a) 측정에 상용된 비누의 실제 이미지 (b) 일반적 확산 모델을 이용하여 얻은 광학적 특성치를 스탠포드 버니에 적용한 이미지 (c) Hybrid-P3 근사화를 이용하여 얻은 광학적 특성치를 스탠포드 버니에 적용한 이미지

것을 알 수 있다.

7. 결론

우리는 일반적 확산 모델이 가지고 있는 한계를 극복하고자 hybrid-P3 근사화 방법을 사용하여 반투명 재질을 표현하였다. 또한 제안하는 방법에 적합한 측정 장비를 개발하여 반투명 재질의 광학적 특성을 추정하고 이를 렌더링 과정에 적용하였다. 결과를 통하여 변수가 감소한 산란 변수보다 상대적으로 큰 재질의 경우 hybrid-P3 근사화 방법이 일반적 확산 모델보다 실제 재질을 더 잘 표현하는 것을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2009 년도 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단 도약연구사업(No. 20090083091)의 지원을 받아 수행 되었습니다.

참고문헌

- [1] A. Ishimaru, "Wave propagation and scattering in random media," Oxford U. press, Oxford UK, Chap. 7, (1997)
- [2] K.M Case and P. F. Zweifel, "Linear Transport Theory," Addison-Wesley, Reading, Mass, Chap.2, (1967)
- [3] M. S. Patterson, B. C. Wilson, and D. R. Wyman, "The propagation of optical radiation in tissue I. models of radiation transport and their application," Lasers Med. Sci. 6, 155-168, (1991)
- [4] Stefan A. Carp, Scott A. Prah, and Vasanth Venugopalan,

“Radiative transport in the delta-P1 approximation: accuracy of fluence rate and optical penetration depth predictions in turbid semi-infinite media.” *J. Biomed. Opt.* 9, 632-647 (2005)

- [5] T. J. Farrell, M. S. Patterson, and B. Wilson, “A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo,” *Med. Phys.* 19, 879-888 (1992)
- [6] H. W. Jensen, S. R. M. Levoy and P. Hanrahan, “A practical model for subsurface light transport,” *Comput. Graph. Proc. Ann. Conf. Series (SIGGRAPH2001)*, 511-518 (2001)
- [7] L. H. Edward, H.F. Thomas, Steady-state reflectance spectroscopy in the P3 approximation, *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 2001.